

AEROSOOLID JA RADIOAKTIIVSUS KESKKONNAS

Hannes Tammet, Eduard Tamm, Jaan Salm

Tartu Ülikooli keskkonnanafüüsika instituut

Enn Realo

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, tuumaspektroskoopia labor

Eksperimentaalne uurimistöo keskkonnanafüüsika alal on Tartu Ülikoolis toimunud peamiselt keskkonnanafüüsika instituudis (atmosfääriaerosool) ja Füüsika Instituudi tuumaspektroskoopia laboris (keskkonna radioaktiivsus). Atmosfääri radioak-

tiivsete lisandite, peamiselt radooni uurimisel on need kaks uurimisrühma teinud otsest koostööd. Instrumentaalsete vaatluste kõrval on tegeldud ka teoreetilise modelleerimisega. Töö sisu kajastub allpool.

NANOMEETEROSAKESED ÕHUS

Atmosfääriõhk on tegelikult aerosool – gaasiline keskkond selles hõljuvate mitmesuguste vedelate ja/või tahkete osakestega. Need aerosooliosakesed on õhu vältimatud lisandid. Atmosfääri kogumassist moodustavad aerosooliosakesed tühise osa. Maapinna lähedal sisaldab üks kuupmeeter õhku ligikaudu 1,2 kilogrammi gaase – lämmastikku, hapnikku, veeauru, süsihappegaasi jt ning ainult 0,1 milligrammi suurusjärgus aerosooliosakesi. Sellel tühisel massiosal on siiski oluline roll atmosfääris toimuvates füüsikalistes, keemilistes ja bioloogilistes protsessides.

Aerosooliosakeste mõõtmed varieeruvad nanomeetri (1 nm on miljondik millimeetrit) murdosast mõnekümne mikromeetrini. Valgusvihus nähtavad tolmuosakesed on läbimõeldult üle poole mikromeetri. Et nähtava valguse lainepikkus on 400–750 nm, siis aerosooliosakesed läbimõelduga alla saja nanomeetri ei hajuta oluliselt seda valgust ja ei mõjuta nimetamisväärselt õhu läbipaistvust. Ometi pööravad teadlased nendele üliväikestele osakestele üha enam tähelepanu, eelkõige seoses kliimamuutustega.

Ebasoodsate kliimamuutuste ärahoidmine nõuab suuri kulutusi, kulutuste õige suunamine aga rohkem teadmisi kui meil praegu on. Inimtegevus mõjutab kliimafaktoritest mitte ainult kasvahoone-

gaaside hulka, vaid ka maakera pilvkatet. Pilvede mõju Maa soojusvahetusele oleneb pilvede struktuurist. Ühest ja samast veehulgast võib saada palju peente tilkadega valgeid pilvi või ühe suure äikesepilve, millest võib sadada nii põlde kosutavat vihma kui saaki hävitavat rahet. Seetõttu on oluline tunda pilvede struktuuri kujunemise seaduspärasusi.

Mida väiksem tilk, seda raskem on tal kasvada ja kergem aurustuda. Uute tilkade tekkimine absoluutselt puhtas õhus on praktiliselt võimatu. Tilgad hakkavad kasvama kondensatsioonituumadeks nimetatavatest aerosooliosakestest, mille läbimõeld on minimaalselt mõnikümmend nanomeetrit. Kui neid on palju, siis tekib samast hulgast veeaurust palju väikesi tilku, kui aga vähe, siis vähe suuri tilku. Nanomeeterosakeste eluiga õhus ei ületa mõnd päeva ja neid peab kogu aeg juurde tekkima. Kondensatsioonituumade tekkimist õhu lisandgaasidest nimetatakse nukleatsiooniks, selles protsessis on aga veel palju tundmatut.

Inglise teadlane C. T. R. Wilson näitas Nobeli preemiaga pärjatud uurimuses juba ammu, et veeaur võib kondenseeruda ioonidel. Ioonide ja elekt-riliste jõudude osa kliimat kujundavates protsessides pole aga tänaseni päris selge. Tartu Ülikooli teadlaste viimaste aastate tulemused on aidanud

mõista elektrilaengute olulisust nanomeeterosakeste tekkimisel ja kasvamisel atmosfääriõhus.

NUKLEATSIOONI JA NANOMEETER-OSAKESTE KÄITUMISE TEOREETILINE MODELLEERIMINE TÜ KESKKONNA-FÜÜSIKA INSTITUUDI AEROELEKTRILABORATOORIUMIS

Nukleatsioon tähendab *ca* 0,35 nm läbimõõduga gaasimolekulide ühinemist klastriks ja selle järgnevat kasvamist aerosooliosakeseks. Kasvamisel on kõige raskem läbida kriitilist läbimõõduvahemikku ühest kuni kümne nanomeetrini. TÜ aeroelektrilaboratooriumis on paralleelselt arendatud kaht teoreetilist mudelit. Üks neist kirjeldab molekulide ühinemist elektrilaengut kandva iooni ümber molekulaarklastriks ja võimaldab kirjeldada keemilise kineetika meetodi abil klastri kasvu kuni ühenanomeetrilise läbimõõduni, teine kasutab termodünaamika meetodit ja kirjeldab adekvaatselt osakeste kasvamist alates kahest-kolmest nanomeetrist. Senised tulemused on eelduseks, et osakeste kasvu usaldusväärselt modelleerida teooriale seni kättesaamatus läbimõõduvahemikus 1–2 nm, mis on kaasaegse nukleatsiooniteooria võtmeprobleem.

Suure molekuli omadustega klastri ja makroskoopilise keha omadustega aerosooliosakese eristamise probleemile leiti Tartus lahendus osakeste suuruse ja liikumistakistuse vahelise seose teoreetilise uurimise käigus. Omaduste järsk muutus toimub 1,6 nm läbimõõdu ümbruses. Üliväikeste osakeste puhul saab lihtsal viisil mõõta ainult liikuvusi ja osakese läbimõõdud arvutatakse liikuvuse järgi. Vaadeldava uurimistöö rakenduslikuks tulemuseks oli varasemast oluliselt täpsem meetod nanomeeterosakeste läbimõõdu arvutamiseks.

Nanomeeterosakesed atmosfääriõhus mitte ainult ei kasva, vaid ka vahetavad elektrilaenguid ja hävivad, sadestudes õhus hõljuvatele suurematele osakestele ja maapinnal asuvatele objektidele (nt puude võradele). Ülesande keerukus takistab nanomeeterosakeste arengu analüütilist modelleerimist. Aeroelektrilaboratooriumis koostatud numb-

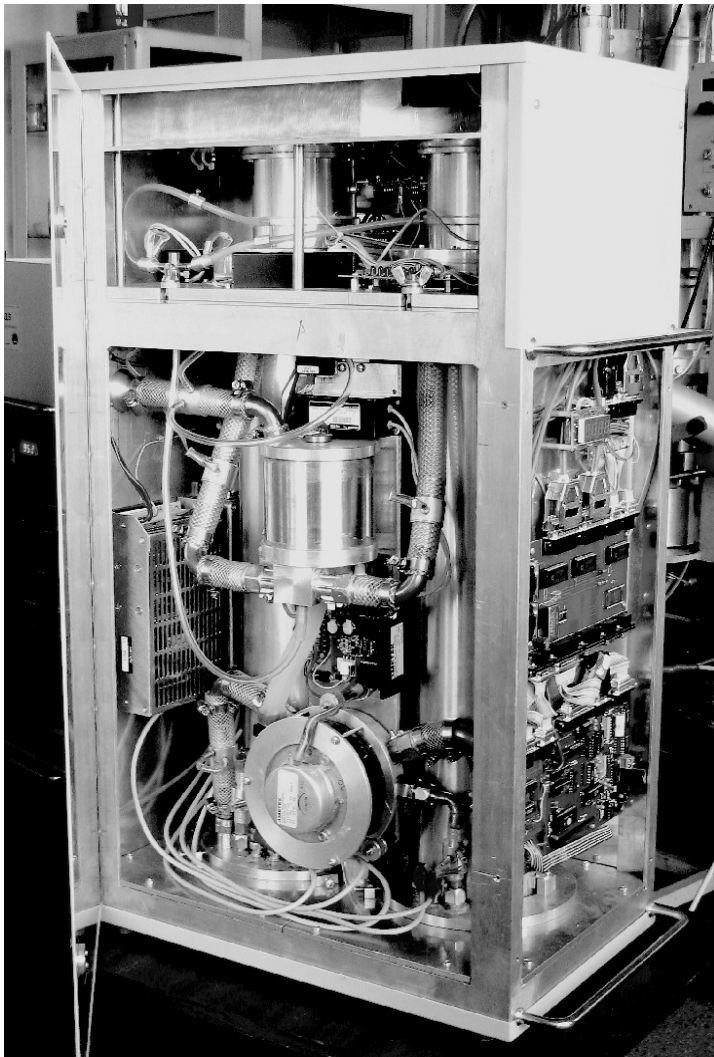
riiline mudel võimaldab reguleerida 94 sisendparameetrit ja simuleerida nukleatsiooni ning nanomeeteraerosooli mõõtmespektri arengut mitmesugustes tingimustes.

Nanomeeterosakeste sadestumisele avaldab mõju ka elektrilaeng ja atmosfääri elektriväli. Teoreetiliste arvutuste ja kuuse ladvaokaste radioaktiivsuse mõõtmise teel tõestati, et elektriväli kiirendab radooni laguproduktide ja laetud nanomeeterosakeste sadestumist puudele, eriti aktiivselt okaspuude ladvaokastele.

ELEKTRILISE LIIKUVUSSPEKTROMEETRIA ARENDAMINE

TÜ keskkonnanafüüsika instituudi aeroelektrilaboratooriumis on loodud üks atmosfääri nanomeeteraerosooli uurimise põhimeetodeid: osakeste elektriliste liikuvuste paljukanaliline spektromeetria. Tehnilise arendustöö ja tootmise jaoks asutati TÜ spin-off firma AS Airel (www.airel.ee). Paljukanaliline aerosoolispektromeeter EAS on keerukas aparaat, mis sisaldab 32 elektromeetrilist võimendit ja mille rakenduseks on keskkonnanafüüsika teadusuuringud (vt foto). EAS kasutusala ei piirdu ainult nanomeeterosakestega, selle mõõtepiirkond on unikaalselt lai: 3 nm kuni 10 µm. Airel AS tootmisvõimsus on väike. Firma müüs paljukanalilise mõõtmise tehnoloogia litsentsi ka maailma suurimale aerosoolianalüüsi aparatuuri tootjale TSI Inc. (USA). TSI toodab Aireli litsentsi järgi autotööstuse jaoks 32-kanalilisi analüsaatoreid "Engine Exhaust Particle Sizer" (EPPS™), vt www.tsi.com/Product.aspx?Cid=161&Cid2=92&Pid=82.

Atmosfääri nukleatsiooniuringute tähelepanu keskpunkti on tõusnud laetud nanomeeterosakesed, mis on tuntud ka kui aeroioonid. Aeroelektrilaboratooriumis tegeldakse viimastel aastatel aktiivselt aeroioonide liikuvusespektromeetria meetodite ja aktsiaseltsis Airel vastava tehnoloogia arendamisega. AS Airel toodab 42-kanalilisi aeroioonide spektromeetreid AIS, mille abil on uuritud aeroioonide suurusjaotust Antarktikast ja Alpi kõrgmägedest Lapi tundrateni.



Aerosoolispektromeeter EAS.

Eriti väikeste osakeste suurusjaotuse mõõtmist häirib soojusliikumine. Tartus realiseeriti esmakordselt Hispaania teadlase Loscertalesi poolt 1998. a teoreetiliselt avastatud kaldväljade meetod, mis võimaldab seni võimalikuks peetust paremat eraldusvõimet. AS Aireli poolt ehitatud kaldväljaga ioonispektromeetri abil on Minnesota Ülikool (USA) saanud nukleatsiooni uurimisel olulisi uusi tulemusi.

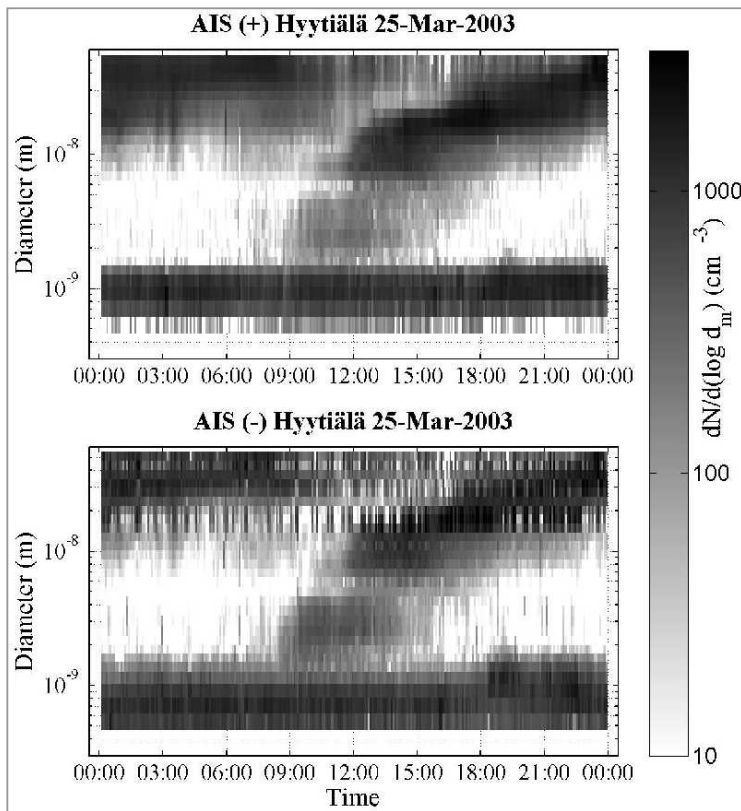
ATMOSFÄÄRIÕHU NANOMEETEROSAKESTE MÕÕTMINE

Kõige mahukam ja põhjalikum atmosfääriõhus leiduvaid laetud nanomeeterosakesi kirjeldav andmestik on kogutud Tartu teadlaste poolt Tahkuse Õhuseirejaamas Pärnumaal, kus alates 1984. aastast töötab laiapiirkonnaline paljukanaliline liikuvusespektromeeter. Juba 1985. a avastati seal 1-2 nm läbimõõduga aeroioonide tekkepuhangud, mille füüsikaliskemiline olemus on sama, mis viimastel aastatel atmosfääriaerosooli uurijate tähelepanu keskmesse tõusnud nukleatsioonipuhangutel. Põhiosa tänapäeva teadmistest laetud nanomeeterosakeste puhangute kohta on saadud TÜ aroelektrilaboratooriumi teadlaste koostöös Helsingi Ülikooli teadlastega (vt joonis 1).

Tartu aerosooliteadlaste rahvusvaheline koostöö erineb tavapärasest: siin ei kasuta meie teadlased partnerite aparatuuri, vaid vastupidi, koostöö tugineb Tartus välja töötatud aparatuuri kasutamisele välispartnerite poolt.

TÜ aroelektrilaboratooriumis loodud liikuvusespektrometritega on mõõdetud atmosfääriaerosooli osakeste suurusjaotust paljudes kohtades.

Aerosoolispektrometriga EAS on korraldatud mõne nädala kuni viie kuu pikkusi mõõteseriaid Eestis, Soomes, Leedus, Iirimaa, Saksamaal ja Hollandis. Tahkusel toimub juba teist aastat aastaringne pidev seire. Mõõtmistulemuste alusel on loodud osakeste suurusjaotuse statistiline mudel Läänemere regiooni jaoks sõltuvalt õhumasside päritolust. Huvitavaid tulemusi on andnud sünkroonne mõõtmine mitmes eri kohas: on hinnatud



Joonis 1.

Laetud nanoosakeste mõõtmispektri areng nukleatsioonipuhanguga kevadpäeval.

saastelevi kiirust ja ühe vaatlusjaama esinduslikkuse pindala, mida on tarvis teada seirevõrkude planeerimisel. Kui seni loeti rannikutsoonis esinevate nukleatsioonipuhangute ainsaks põhjuseks mõõna ajal paljastuva merepõhja taimestiku poolt eritatavaid gaase, siis meie mõõtmised Iiri maal koostöös Galway Ülikooli teadlastega näitasid, et ka siin esinevad külma arktilise õhu sissetungiga seotud puhangud, mis on tavalised parasvöötme mandrialadel.

Aeroelektrilaboratooriumi teadlaste osalusel uuriti Erfurtis, Kuopios ja Helsingis EU projekti ULTRA raames esmakordselt linnaõhu nanomeeterosakeste mõju inimeste tervisele. EAS abil teh-

tud mõõtmiste tulemusi kasutades näidati, et teatud perioodidel on oluline just peenimate osakeste (läbimõõt <30 nm) tervistkahjustav toime.

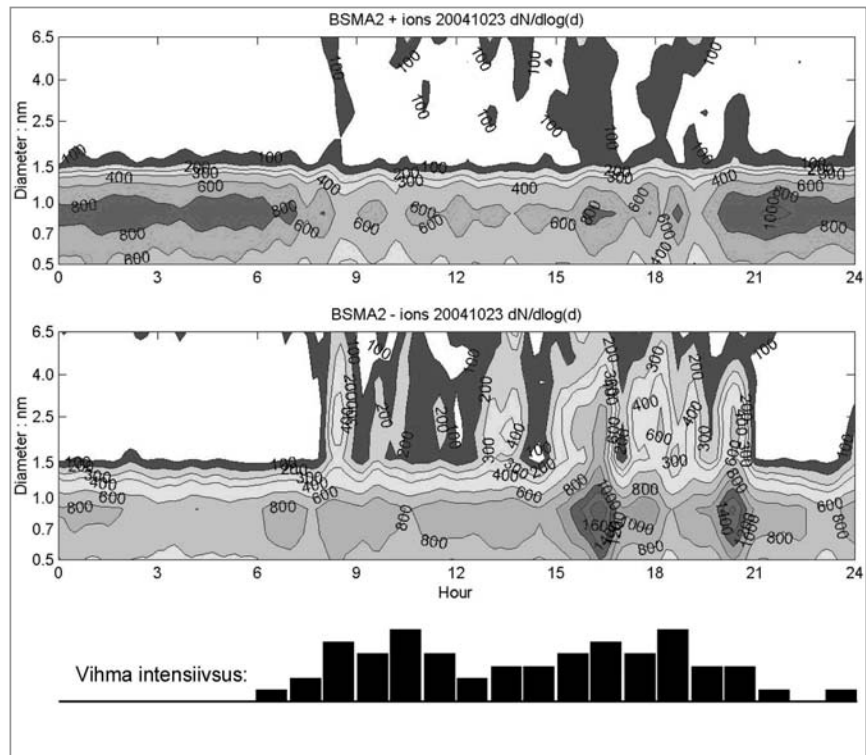
Tartus välja töötatud ja valmistatud aeroioonide liikuvusespektrometritega AIS ja BSMA toimub laetud osakeste pidev seire Soomes Hyytiäläs ja Eestis Tartus; mõõtmiskampaaniaid on korraldatud Lapi maal, Šveitsi Alpides 3,5 km kõrgusel, Atlandi ookeanil, Antarktises ja Austraalias. Üks tulemustest näitab, et nõrkade nukleatsioonipuhangute korral on negatiivseid nanomeeterosakesi positiivsetest palju rohkem ja negatiivsetel klasterioonidel toimuv ioon-indutseeritud nukleatsioon on oluline nähtus. Kogunevate mõõtmistulemuste andmebaasi analüüsimine aitab täpsustada kliimamudeleid.

Elektriliselt laetud või neutraalsete klastrite kasvamisel tekkinud pisimad aerosooliosakesed (läbimõõt > 1,6 nm) kasvavad edasi neile õhu lisandgaaside molekulide kondenseerumise ja omavahelise liitumise (koagulatsiooni) teel.

Eksperimentaalselt on see protsess jälgitav nukleatsioonipuhangute ajal, mil väikeste osakeste kontsentratsioon on suur. Kaasaegsete aerosoolispektrometritega saab osakeste kasvu jälgida alates läbimõõdust 3 nm.

Aeroelektrilaboratooriumis loodud aeroioonide liikuvusespektrometrid võimaldavad aga jälgida laetud osakeste kasvuprotsessi alates klastritest kuni 80 nm läbimõõduni. Nende mõõtmiste alusel täpsustatakse nukleatsiooni ja osakeste kasvamise algstaadiumi teoreetilisi mudeleid. Selle uurimistöö praktiliseks väljundiks on parem arusaamine pilvede kujunemisest ja seda mõjutavatest faktoritest.

Nukleatsiooniuringute viimaseks uudiseks on Tartu teadlaste avastatud intensiivne nanomeeterosakeste tekkimine vihmatilekade langemisel maapinnale. Tilkade laialipritsumisel ja aurustumisel tekkivad algselt ainult negatiivselt laetud osakesed, mis hiljem neutraliseeruvad ja vähesel hulgal ka positiivselt laaduvad. Joonisel 2 esitatakse mõõtmine on tehtud aroelektrilaboratooriumis konstrueeritud ja ehitatud unikaalse skaaneriva spektrometriga BSMA2.



Joonis 2.

Nanomeeterosakeste mõõtmejaotuse areng Tartu linna õhus vihmasel päeval (sademete koguhulk 12 mm).

EESTI KESKKONNARADIOAKTIIVSUS

Radioaktiivsus keskkonnas ja sellest tekkiv kiirgusdoos on riikliku seirevajaduse kõrval ka teadusuuringute objektiks kõigis riikides, erandiks ei saa olla ka Eesti. Selleks ei kohusta ainult rahvusvahelised kokkulepped ja EURATOMi asutamislepingul põhinev seadusandlus, vaid ka vajadus anda inimestele sellealast asjatundlikku teavet, olla valmis seireandmeid teaduslikult tagama ja mõtestama, hinnata/prognoosida olukorda ja arenguid kiirgustegevuste, avariide korral jpm. TÜ Füüsika Instituudis algatati laboritöötajate initsiatiivil uuringud selles valdkonnas 1990ndate aastate alguses. Tegevus on keskendunud järgmistele küsimustele:

- Keskkonna radioaktiivsuse uuringud Eestis, saamiseks teavet

- ✓ looduslike ja tehnilike radionukliidide levikust pinnases, õhus ja vees;
- ✓ radioökoloogilistest kiiritusradadest ja doosikujunemisest, neid mõjustavatest allikatest energiatootmises, radioaktiivsete jäätmete käitlemises.
- Gammaspektromeetrilise analüüsi ja numbrilise modelleerimise meetodite evitamine ja arendamine, sh
 - ✓ madalaenergeetilise HPGe- γ -spektrometria, keskkonnaproovide kvantitatiivanalüüsi kvaliteeditagamise meetmete, rahvusvaheliste võrdlusharjutuste kaudu;
 - ✓ radionukliidide levi ja õhku, vett ja pinnast hõlmavate kiiritusradade radioökoloogilistes mudelites;

- ✓ γ -kiirguse resonantsotsehajumise ülipeenvastastikmõjude mudelites.

RADIONUKLIIDID KESKKONNAS

Kogutud proovide suure eraldusvõimega γ -spektromeetrilise analüüsi abil on tehtud Eesti pinnaste looduslike (^{40}K , $^{235,238}\text{U}$ - ja ^{232}Th -ridade) ning tehislake ($^{134,137}\text{Cs}$) radionukliidide sisalduse sügavus- ja geograafilise jaotuse süstemaatiline uuring. Keskmised radionukliidi kontsentratsioonid Eesti pinnases varieeruvad lokaalselt laiades piirides, kuid nad on, välja arvatud *ca* poolteist korda väiksem tooriumisisaldus, lähedased ülemaailmsetele keskmistele. Tulemused näitavad keskmisi suurusi oluliselt ületavaid lokaalseid uraani/raadiumisisaldusi, Tšernobõli avarii radiotseesiumi sadenemisi ning uraanirea $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ mittetasakaalulisust Virumaa pinnases. Suure arvu pinnaseprofiilide radionukliidisisalduse korrelatsioonidest järeldub ka Eesti keskmisest erineva ^{238}U , $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ -suhtega pinnaste esinemine. Selle ala muld on tugevalt mõjustatud kahe suure põlevkivielekt-rijaama lendtuhast, sh selle looduslike radionukliidide sadenemisest.

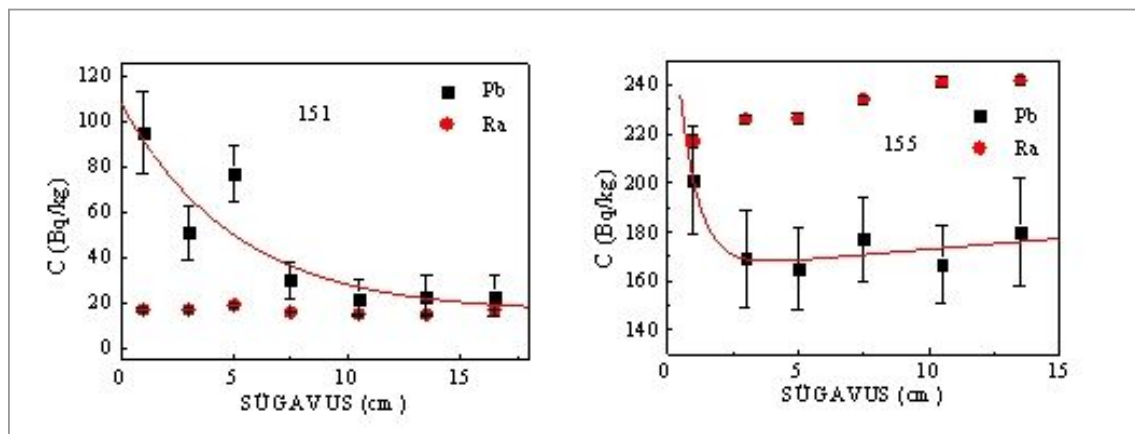
Põlevkivi ja selle tuha erinevate fraktsioonide analüüs andis lähteandmed erinevate radionukliidide atmosfäärsete erimeissioonide ja “kütus-tuhk” bilansi, õhulevi ja pinnasele sadenenud radionukliidide voo määramiseks, mudelarvutused – tehnogeense saaste tekitatud kiirgusdooside ja nende geograafilise jaotuse hindamiseks. Seni on saadud ka esialgsed andmed radionukliididest muudes kohalikes kütustes (puit, turvas ja nende segud) ja nende tuhkades. Tšernobõli avarii $^{134,137}\text{Cs}$ sügavusjaotuse uurimine pinnases lubas välja töötada ajasõltuva migratsiooni 1D-difusioonimudeli ja määrata migratsiooniparameetrid meie keskkonnas, mis on oluline teave võimaliku tuumaavarii tagajärgede hindamiseks.

Viiimastel aastatel on põhitähelepanu keskendunud ^{210}Pb leviku ja levi iseärasuste selgitamisele õhus ja mullas. See pikaealine ($t_{1/2} = 22$ a) uraanirea nukliid tekib radooni radioaktiivsel lagunemisel

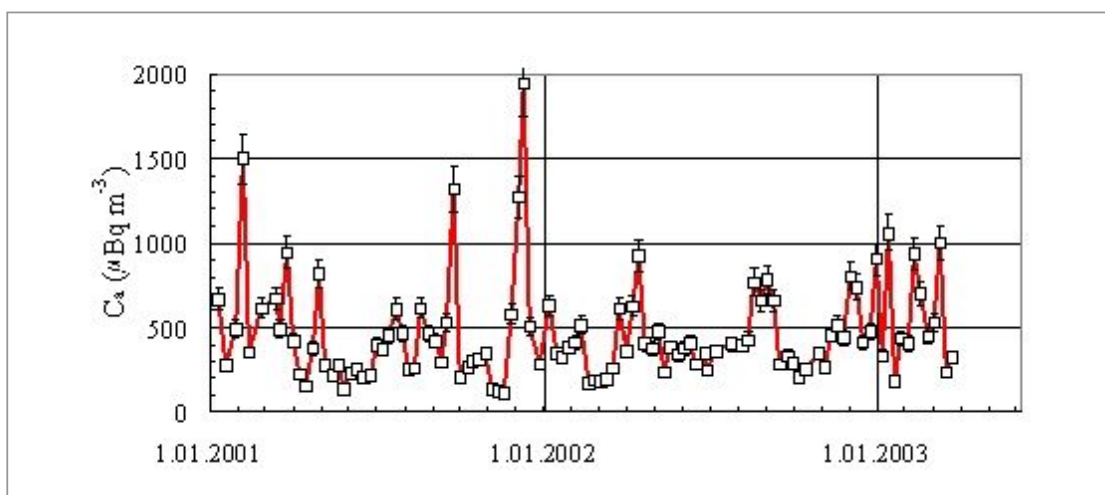
nii maapinnas kui ka õhus, kust ta sadenemisprotsesside tulemusena uuesti pinnasele sadeneb ja sügavusse migreerib. Nii on pinnase ülakihid ^{210}Pb suhtes raadiumiga võrreldes enamikus paikades rikastunud. See ei kehti aga Virumaa raadiumirikaste pinnaste puhul, mis kujutavad endast selles suhtes suhteliselt unikaalset uurimispiirkonda. Sellel alal on sadenenud fraktsiooni eristamine pinnasega seotust võimalik ainult vastava mudeli kasutamise toel koos raadiumisisalduse ja radooni emanatsiooniandmetega (joonis 3). Koostöös kasutati Kiirguskeskuse kogutud suuremahuliste õhukogujate aerosoolfiltriproove, mis analüüsiti madalaenergeetilise HPGe- γ -spektromeetri abil. Tulemusena on olemas mitmeaastane rida ^{210}Pb sisalduse andmeid Harku, Narva-Jõesuu (joonis 4) ja Tõravere õhus, mida pidevalt jätkatakse.

Õhust sadenenud pliifraktsiooni edukas eristamine pinnase sügavusjaotustes lubas koos õhukontsentratsiooni andmetega määrata ^{210}Pb sadenemisvood ja sadenemiskiiruse õhust pinnasele proovikogumise paigas. Kõiki neid keerulisi protsesse õnnestus edukalt modelleerida difusiooni- ja plokkmu-delite abil ning leida vastavad mudeli sisendparameetrid. Kooskõlas mudelhinnangutega leiti Virumaal elektrijaamade lähistel oluliselt suurem ^{210}Pb sadenemisvoog kui nendest eemal, mis kinnitab tehnogeense saaste mõju. Samas on keskmised pinnasemigratsiooni iseloomustavad suurused kummalgi juhul sarnased. Praegu on töös ^{210}Pb -sisalduse ja jaotuse uurimine turbaprofiilides, järvesetetes, samblikes ning loodusliku ^7Be sisalduse määramine õhus. Käivad ettevalmistused α - ja β -kiirgavate nukliidide analüüsides alustamiseks keskkonnaproovides.

Paljudes Eesti piirkondades on joogivee radionukliidisisaldus ja sellest saadav aastadoos suurem kui vastav Euroopa Liidu aktsioonitase. Meie labor on neis uuringutes osalenud lühiajaliselt, kuid ometi oma hiljutiste analüüsides ja hindamisega seni veel puudulikku andmebaasi aidanud täiendada ning vastumeetmeid kaaluda (koostöö Sotsiaalministee-riumiga).



Joonis 3.
 ^{210}Pb ja ^{226}Ra aktiivsuse kontsentratsiooni sügavusjaotused pinnases: vasakul – raadiumivaeses ja paremal – raadiumirikas pinnases. Pidevjoon on vähimruut-sobitus 1D-difusioonlevi mudeli abil.



Joonis 4.
 ^{210}Pb aktiivsuse kontsentratsioon Narva-Jõesuu õhus 2001–2003. Pikaajaline keskmine – $450 \mu\text{Bq m}^{-3}$.

MODELLEERIMINE RADIOÖKOLOGIAS JA γ -KIIRGUSE OTSEHAJUMISEL

Mudeleid ja nende kasutamist plii levil õhus ja pinnases ning $^{134,137}\text{Cs}$ puhul pinnases refereerisime lühidalt ülalpool. Lisaks kasutati laboris arendatud ja verifitseeritud radionukliidilevi mudelite

Eesti oludele kohandatud tarkvarapakette (LENA, Rootsi; RESRAD, USA jm) edukalt lepingu uurimustes Paldiski, Sillamäe ja Tammiku radioaktiivsete jäätmete käitlemise rajatiste pikaajalise (kuni 10000 a) keskkonna kiirgusmõju ja kiirgusdooside hindamisel õhu, vee ja pinnase kiiritusradade kau-

du. Hindamine hõlmas seejuures kiirgustöötajate ja elanikkiirituse doose – normaalse tegevuse ja avariisituatsioonide kiirgus-mõju lähi- ja kaug-ümbruses. Tarkvara ja hindamise tulemused koostöös radioaktiivsete jäätmete käitlemise asutustega AS A.L.A.R.A. ja AS ÖKOSIL on rakendatavad ka erinevate ohuolukordade (kiirgusavarii, saastepomm jm) tekitatud elanikkonna kiirgusmõju hindamisel ja prognoosimisel. Arendamisjärgus on γ -kiirguse levi Monte Carlo meetodil põhineva tarkvara kasutuselevõtt γ -spektromeetria ja kiirgusohutuse probleemide modelleerimiseks.

Järgnev ei kuulu otseselt praegu veel keskkonna radioaktiivsuse valdkonda, ehkki metoodika seda võimaldaks. Pidevalt on jätkunud pikaajaline ühistöö Lübecki Ülikooli kolleegidega sünkrotronkiirguse tuumaresonants-otsehajumise metoodika teoreetiliste ja arvutusmodelite arendamisel, meil väljatöötatud ja Lübecki Ülikoolis evitatud tarkvarapaketi SYNFOSS kasutamisel biomolekulaarsetes ainetes juhuslikult orienteeritud ^{57}Fe -sisaldavate lisandite eksperimentaalsete ajasõltuvate Mössbaueri-spektrite numbrilisel simulatsioonil sisetistes ja välistes elektri- ja magnetväljades lõhestatud nivoode tingimustes. Lühidalt, leitud on hea kooskõla originaalsel teoreetilisel käsitlusel põhinevate mudelarvutuste ning HASYLABi ja ESRFi Mössbaueri kiireliinil tehtud katsete vahel. Lisaks on arendatud γ -polaritonide teooriat sünkrotronkiirguse tuumaresonants-otsehajumise ajasõltuvustes ilmnevate aine omadusi iseloomustavate ülipiiravastastikmõjude kirjeldamiseks.

APARATUUR JA PERSONAL

Labori põhilised seadmed keskkonnaproovide kvantitatiivseks analüüsiks on kolm kaasaegset madalafoonilist suure eraldusvõimega HPGe γ -spektromeetrit koos spektrianalüüsi tarkvara ja lisaseadmetega, mis eranditult on saadud Põhjamaade ja muude abiprojektide arvelt. Palju tööd on tehtud madalaenergeetilise γ -spektromeetria meetodi arendamisel (ainus omataoline seade Ees-

tis!) ^{210}Pb , ^{238}U , ^{234}Th , ^{241}Am analüüsimiseks keskkonnaproovides, radooni emanatsioonikoefitsiendi määramiseks keskkonnaproovides ja analüüsikvaliteedi tagamiseks. Proovikogumise ja ettevalmistusseadmete hulka kuuluvad originaalsed pinnasepuurid, GPS-seadmed, aja ja kaalu täpse määramise seadmed, kalibratsioonistandardid ja referentsained.

Laboris rakendatud meetodite pädevust ja analüüsijate kõrget taset kinnitavad arvukate regulaarsete IAEA, Põhjamaade ja Baltimaade rahvusvaheliste analüüsi võrdlusharjutuste, sh nn *proficiency test*'ide, head tulemused. Meie saadud Eesti pinnase radioaktiivsuse andmed on lülitatud mitme rahvusvahelise organisatsiooni publikatsioonidesse, sh UNSCEARi aruandesse ÜROle (2000).

Labori töötajad on osalenud täitjate või kohalike ekspertidena arvukates rahvusvahelistes kahe- ja mitmepoolsetes EL, IAEA, Põhjamaade tuumaohutuse programmi NKS, Rootsi, Taani jm projektides ja saanud erialast täiendkoolitust kursustel Austrias, Saksamaal, Jaapanis, Rootsis jm. Samuti on nad andnud ja annavad oma aktiivse panuse ekspertidena ja eelnõude kaasautoritena Eesti kiirgusseadusandluse väljatöötamisel (Keskkonnaministeerium, Kiirguskeskus), oskussõnavara arendamisel (Õigustõlke Keskus, Euroopa komisjon), joogivee radioaktiivsuse probleemide lahendamisel (Sotsiaalministeerium). 2005. a nimetas Euroopa Ministrite Nõukogu oma määrusega Enn Realo Euroopa Aatomienergiaühenduse EURATOM teaduse- ja tehnikakomitee liikmeks.

Kogu tegevuse kestel on labori töötajad olnud seotud TÜ õppetöoga, pidevalt on laboris olnud tegevuses iga astme üliõpilasi. Labori tegevusest on välja kasvanud keskkonna radioaktiivsust ja kiirgusohutust käsitlevad paljud üksikloengud spetsialistidele, mitmeid aastaid esitatud loengukursused või nende osad keskkonnanafüüsika ja -tehnoloogia üliõpilastele, tervisekaitse magistrantidele, edukalt kaitstud bakalaureuse-, magistri- ja doktoritööd.